



Analýza využití 3D tisku pro výrobu tlakových nádob

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Filip Veselka**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip Veselka**
Osobní číslo: **S16000463**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Analýza využití 3D tisku pro výrobu tlakových nádob**
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Hlavním cílem této bakalářské práce je analýza využití technologie 3D tisku pro výrobu upravené expanzní nádoby k motoru GSXR 600r, který je použit v projektu Formule Student 2015. Úpravy mají vést k hmotnostnímu odlehčení celého monopostu.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií 3D tisku a zařízeními v laboratořích katedry.
2. Provést analýzu současného stavu využívání 3D tisku pro výrobu tlakových nádob.
3. Navrhnout upravenou expanzní nádobu a na základě analýzy zvolit vhodnou technologii 3D tisku pro výrobu.
4. Vyrobit prototyp nádoby.
5. Provést tlakové testy na prototypu nádoby.
6. Provéřit vyrobený díl na zkušebním monopostu.
7. Vyhodnotit přínos uplatnění technologie 3D tisku pro oblast řešenou v této práci.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **40 stran textu včetně příloh**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] SHIGLEY, J.E., Ch.R. MISCHKE a R.G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
[2] NOORANI, R. *Rapid Prototyping: principles and applications*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
[3] JACOBS, P. F. *Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
[4] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
[5] HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miloš Čadek**
Ostatní konzultanti: **Ing. Petr Zelený, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání bakalářské práce: **1. března 2017**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2018**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. června 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 30.6.2017

Podpis: FILIP VESELKA



Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Jiřímu Šafkovi Ph.D. vedoucímu práce, za odborné vedení, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích k vypracování bakalářské práce.

Děkuji panu Ing. Martinovi Lachmanovi Ph.D. za pomoc při testování expanzních nádob vyrobené pomocí RP.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem expanzní nádoby chladicího systému motoru studentské formule. Pro zhotovení prototypu expanzní nádoby bylo využito několik technologií 3D tisku (FDM, SLA, SLS). Práce obsahuje popis jednotlivých technologií 3D tisku a jejich materiálové možnosti s akcentem na potřebné mechanické a tepelné vlastnosti. V práci je popsáno navrhnuté konstrukční řešení nádoby, kde je řešeno, jak tepelné, tak tlakové zatížení nádoby při jejím provozu. V praktické části bakalářské práce je zhodnocena výroba několika prototypů nádoby, které byly následně testovány. Závěr práce obsahuje doporučení optimálního řešení, pro vybavení vozu studentské formule v sezóně 2017/2018.

Klíčová slova

3D tisk, expanzní nádoba, FDM, SLA, SLS, Rapid Prototyping

Abstract

The bachelor thesis deals with a design of expansion vessel which is a part of Formula Student car's cooling system. For completing the prototype of expansion vessel, some of the 3D print technologies (FDM, SLA, SLS) were used. The thesis contains a description of each 3D print technology and its material options with the emphases on mechanical and thermal properties. Also, there is a description of a newly designed vessel, in which both thermal and mechanical load while working are discussed. In the practical part of the bachelor thesis there is an evaluation of manufacturing several prototypes of the vessel which were then tested. In the conclusion of the work, there is an optimal solution of a vessel implementation into the car for the season 2017/2018 recommended.

Keywords

3D print, expansion vessel, FMD, SLA, SLS, Rapid Prototyping

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam zkratk.....	10
Úvod	11
1 Rapid prototyping.....	12
1.1 Technologie RP – proces výroby	12
1.2 Využití RP	13
1.3 Historie	13
1.4 STL Formát - Standard triangle language file.....	14
2 Aditivní technologie	15
2.1 SLA - Stereolitografie	15
2.2 SLS - Selective Laser Sintering	16
2.3 SLM - Selective Laser Melting.....	17
2.4 FDM - Fused Deposition Modeling.....	17
3 Zvolené tiskové materiály.....	20
3.1 Materiály pro SLA technologii	20
3.1.1 Durable	20
3.2 High Temp.....	21
3.3 Materiály pro SLS technologii	22
3.3.1 PA 2200	22
3.3.2 PA 3200 GF.....	22
3.4 Materiál pro FDM technologii.....	23
3.4.1 ULTEM 1010.....	23
4 3D Tiskárny.....	24
4.1 Zvolené druhy 3D tiskáren	24
4.1.1 Tiskárna pro SLA technologii – Form 2.....	24
4.1.2 Tiskárna pro SLS technologii – Eosint P 385	25
4.1.3 Tiskárna pro FDM technologii - Fortus 450mc.....	25
5 Návrh 3D modelu – expanzní nádoby	27
5.1 Předpisy projektu FSAE	27
5.2 Tlaková expanzní nádoba	27
5.3 Požadavky	28
5.4 Návrh 3D modelu expanzní nádoby – Preprocessing.....	29
5.5 Tisk 3D modelu expanzní nádoby – Processing.....	29

5.5.1	Nastavení tiskárny Fortus 450mc a průběh tisku.....	30
5.5.2	Tisk FDM technologií	31
5.5.3	Tisk SLA technologií.....	32
5.5.4	Nastavení tiskárny Form 2 a průběh tisku.....	32
5.5.5	Tisk SLS technologií.....	32
5.6	Operace po tisku – Postprocessing	32
5.6.1	Odstraňování podpůrných struktur FDM technologie.....	33
5.6.2	Odstraňování podpůrných struktur SLA technologie	34
5.6.3	Odstraňování podpůrných struktur SLS technologie	35
6	Experimentální část	36
6.1	Zkouška tlakem – 1.....	36
6.2	Teplotní zkouška	38
6.3	Zkouška tlakem – 2.....	38
7	Zhodnocení.....	39
8	Závěr	41
	Použitá literatura	42
A	Tabulka vzorků.....	48

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdíly STL sítí (12)	14
Obrázek 2: Trojúhelníkové plochy STL souboru (13)	14
Obrázek 3: Rozdílnost tisku (17).....	15
Obrázek 4: Schéma 3D tiskárny pro SLS (48)	16
Obrázek 5: Schéma 3D tiskárny pro FDM (49).....	18
Obrázek 6: Durable - pouzdro na ubrousky (30)	20
Obrázek 7: High Temp - Forma pro lití (32).....	21
Obrázek 8: PA 2200 – Turbína (39)	22
Obrázek 9: PA 3200 GF - Díl karburátoru (40).....	22
Obrázek 10: ULTEM 1010 – Nátrubek (44)	23
Obrázek 11: Tiskárna Form 2 (46)	24
Obrázek 12: 3D Tiskárna EOSINT P 385 (47)	25
Obrázek 13: 3D tiskárna Fortus 450mc (34)	26
Obrázek 14: Výměna materiálů boxů (50)	26
Obrázek 15: Monopost Eliška - příprava usazení expanzní nádoby dle pravidel	27
Obrázek 16: Provoz expanzní nádoby (54).....	28
Obrázek 17: Model Expanzní nádoby z CAD softwaru.....	29
Obrázek 18: Kalibrační vzorek a jeho detailní informace.....	30
Obrázek 19: Znehodnocený vzorek.....	31
Obrázek 20: Vzorek č. 0.	31
Obrázek 21: Model vzorku č. 4 - High Temp.....	32
Obrázek 22: Model vzorku č. 2 - Durable.....	32
Obrázek 23: Proces odstraňování podpůrných struktur	33
Obrázek 24: Vzorek č. 2 - Durable.....	34
Obrázek 25: Vzorek č. 4 - High Temp.....	34
Obrázek 26: Odstraňování podpor vzorku č. 4.....	34
Obrázek 27: Odstraňování podpor vzorku č. 2.....	34
Obrázek 28: Vzorek č. 3 - PA 2200 a vzorek č. 5 - PA 3200 GF.....	35
Obrázek 29: Jednotlivé vzorky před zkouškami	36
Obrázek 30: Vzorek č. 2 připraven k tlakové zkoušce.....	36
Obrázek 31: Vzorek č. 0. po tlakové zkoušce.....	37

Obrázek 32: Vzorky před teplotní zkouškou.....	38
Obrázek 33: Vzorek č. 4 po 2. tlakové zkoušce.....	38

Seznam zkratek

2D	Dvojdimenzionální, dvourozměrný
3D	Trojdimenzionální, trojrozměrný
ABS	Akrylonitril butadien styren, Amorfní termoplastický kopolymer
ABS – PC	Akrylonitril butadien styren-Polykarbonat
CAD	Computer Aided Design, Počítačem podporované projektování
DLP	Digital Light Processing, Paprsek digitálního projektoru
FDM	Fused Deposition Modeling, Proces postupného nanášení taveniny
FFF	Fused Filament Fabrication, Proces postupného nanášení taveniny
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers, Studentská formule
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
PEI	Polyethylenimin, Amorfní termoplast
PLA	Polylactic acid, Kyselina polymléčná
Rep Rap	Replicating Rapid Prototyper, Schopnost seberekopie a rychlého prototypování
RP	Rapid Prototyping, soubor technologií výroby prototypů pomocí 3D tisku
SLA	Stereolithography Apparatus, Proces aditivní výroby
SLM	Selective Laser Melting, Selektivní laserové tavení kovového prášku
SLS	Selective Laser Sintering, Selektivní laserové spékání plastu
STL	Stereolithography Tessellation Language, Stereolitografický formát
TUL	Technická univerzita v Liberci
UV	Ultra Violet, Ultrafialové záření

Úvod

Bakalářská práce se zabývá návrhem expanzní nádoby určené pro chladicí kapalinu na vůz studentské formule. Tato studentská formule je konstruována na Technické univerzitě v Liberci pod Fakultou strojní pro závodní sezonu 2016/2017.

FSAE je mezinárodní projekt pocházející z USA z roku 1978, určený pro studenty Vysokých škol z různých fakult a oborů, od technických až po humanitní a ekonomické. Cílem tohoto projektu je návrh, vývoj a reálná stavba celého monopostu, seznámení s praxí a následné zúčastnění se mezinárodních závodů, kde jednotlivé týmy porovnají své dovednosti.

Expanzní nádoba slouží pro vyrovnávání změn objemu kapaliny způsobenou změnou teploty a zároveň je schopna udržet tolerovaný přetlak v soustavě. Používá se v automobilovém průmyslu a je součástí motoru. Konstrukce takovéto nádoby by měla být navržena tak, aby byla schopná pracovat s tlakem 10 barů.

Návrh expanzní nádoby pro motor Suzuki GSX - R 600 studentského monopostu je striktně omezen pravidly FSAE. Při provozu motoru musí být nádoba schopna pojmout vroucí kapalinu a to bez jakéhokoliv náznaku deformace, musí být utěsněna tak, aby nedocházelo při jízdě monopostu k úniku kapaliny.

Pomocí technologií RP byly vytvořeny modely expanzních nádob. Byly vybrány jednotlivé technologie (SLA, SLS, FDM) jejichž materiály, splňovat teplotní i mechanické namáhání.

Cílem této bakalářské práce je dle požadavku na tlakové expanzní nádoby a pravidel FSAE, navrhnout expanzní nádobu, vyhodnotit nejvhodnější technologii pro výrobu a materiál pro reálné využití, pomocí tlakových a teplotních zkoušek. U každé z technologií bude kladen důraz na přesnost výroby detailů, jako jsou závit M16 x 1,5 pro vodoznaky.

Na základě vyhodnocení a posouzení vyhotovených vzorků byl vybrán nejvhodnější model expanzní nádoby vhodný pro využití v monopostu studentské formule.

1 Rapid prototyping

Rapid prototyping (RP) zahrnuje metody, které se liší postupem nanášení a využívání typů materiálu. Koncept RP lze definovat jako soubor technologií, metod a aplikací, které dnešním vývojářům pomáhají vyvíjet a produkovat výrobky velmi inovativním způsobem. Účelem je zjednodušit výrobní procesy, urychlit výrobu celého dílu a hlavně snížit výrobní náklady. Je možné konstatovat, že v rámci RP jde o možnost zhotovení fyzického tří-dimenzionálního prototypového dílu přímo z digitálního modelu. Za digitální modely považujeme nejčastěji CAD model, který musí být prvotně zhotoven před tiskem (1)(2).

Mezi moderní trendy ve výrobě prototypů patří převážně aditivní technologie. Podstatným rozdílem od konvenčních metod jako je soustružení, frézování a broušení kde dochází k odebírání materiálu, aditivní technologie naopak materiál přidává postupně vrstvu po vrstvě a takto vytvořené díly považujeme za prototypy (3).

1.1 Technologie RP – proces výroby

Při výrobě prototypů je možné využít širokou škálu materiálů. Převážně využívané jsou plasty, kovy a keramika. S těmito materiály se setkáme v podobě například: Setkáme se s těmito materiály v podobě tekutiny, tenké struny namotány na cívce v boxu, kovového nebo polyamidového prášku.

Proces výroby dílu pomocí RP lze definovat do několika fází. Úvodní fází je navržení a tvorba CAD modelu v daných rozměrech a tvarech pomocí Autodesk Inventor. V druhé fázi převedeme CAD model do STL formátu, který byl zvolen ke sjednocení dat pro 3D tiskárny. Dalším krokem je fáze vrstvení, kde se STL model rozdělí na horizontální 2D vrstvy o požadované tloušťce v závislosti na přesnosti. V závislosti na složitosti tvaru modelu lze upravovat nebo odstraňovat vygenerované podpůrné struktury. Předposlední fází celého procesu je kalibrace tiskárny a odeslání numerických dat do tiskárny kde následuje samotný tisk modelu. Závěrečnou fází je post-processing, kde dochází k dotvrzení dílu, očištění podpůrných struktur a celkové finální úpravě (1) (2).

1.2 Využití RP

Technologie RP 3D tisku se primárně využívá k výrobě prototypů, případně dílů, které díky tvarové složitosti nelze vyrobit jiným konvenčním způsobem. Například se jedná o výrobu zdravotnických náhrad (zuby, klouby). RP se používá také v leteckém a automobilovém průmyslu, zdravotnictví a v nespočetně dalších odvětvích.

Tato technologie umožňuje rychlou výrobu prototypů, na kterých se dají doladit technologické nedostatky finálního produktu a to ještě před začátkem sériové výroby. Díky této technologii lze předcházet chybám a zbytečným nákladům (4) (5).

1.3 Historie

Technologii 3D tisku se jako první věnoval profesor Nakagawa z Tokijské University. Pro vytvoření výsledného produktu používal laminátové vrstvy, které po spojení vytvořily potřebnou formu. Ovšem zásluhy za vytvoření první technologie 3D tisku patří Charlesovi Hullovi, který v roce 1984 zkoumal fotopolymery inkoustových tiskáren a objevil specifické fyzikální vlastnosti zajišťující tuhnutí materiálu při působení UV záření. Pracoval na možných způsobech, jak uskutečnit tisk fyzických 3D objektů z digitálních dat. O dva roky později se mu to podařilo a získal patent na aditivní technologii nazvanou Stereolitografie. Na základě toho založil vlastní společnost 3D Systems, kde byla vyrobena první 3D tiskárna SLA 1.

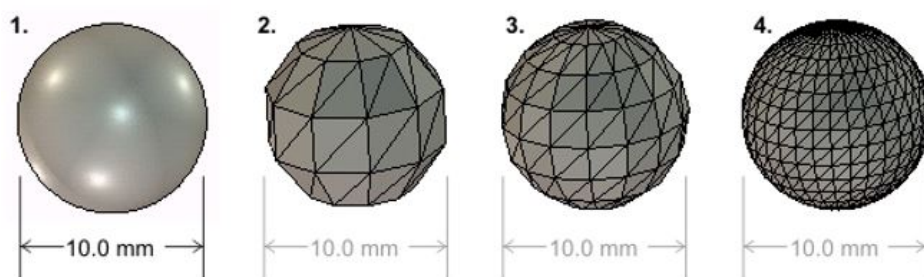
V následujících letech byla zpřístupněna pro veřejnost první tiskárna s názvem SLA-250. V roce 1988 dále vznikly další dva nové způsoby 3D tisku objevené Scottem Crumpem a následně zakládá svojí společnost Stratasys. První vytvořená technologie byla Selective Laser Sintering (SLS). Následující byla Fused Deposition Modeling (FDM).

V roce 1992 byl 3D tisk poprvé použit v leteckém a automobilovém průmyslu, z důvodu rychlého vytvoření prototypů a jejich ozkoušení s možností dalších úprav. Naprosto přelomový okamžik v historii použití 3D tisku nastal v roce 1999, kdy byl 3D tisk použit v medicíně. To otevřelo úplně nové možnosti při transplantaci orgánů. O tři roky později byla dokonce vytisknutá první funkční ledvina pro nemocné zvíře.

V roce 2005 Dr. Adrian Bowyer na Univerzitě v Bath zakládá RepRap, což je tiskárna, která si dokáže vytisknout většinu svých vlastních náhradních dílů. Dále v tomto roce vypršela platnost několika patentů, což se stalo příležitostí pro mnoho velkých investorů, kteří shledali 3D tisk jako revoluční metodu výroby (5) (6) (7).

1.4 STL Formát - Standard triangle language file

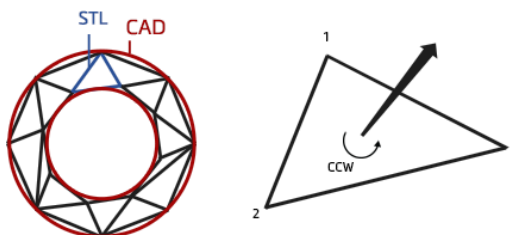
Pro umožnění výroby navrženého dílu na 3D tiskárně je nutné převést vytvořený model v CAD programu do tzv. STL formátu. STL formát neboli stereolitografický formát, případně Standard triangle language je formát, který rozdělí povrch navržené součásti do trojúhelníkové sítě, která tak rozloží povrch na jednodušší tvar. Kvalitu povrchu součásti lze ovlivnit nastavením počtu a velikosti trojúhelníků na ploše dané součásti. Čím jsou trojúhelníky menší a jejich síť hustší, tím je vytištěný díl kvalitnější (8).



Obrázek 1: Rozdíly STL sítí (12)

STL formát zachovává především 2 důležité informace ohledně trojúhelníkových ploch, kterými je povrch tvořen (8).

- Polohu jednotlivých rohů trojúhelníku v prostoru
- Normálový směrový vektor plochy, směřující ven z trojúhelníku, dle kterého program sám vyhodnotí, zda se jedná o rub nebo líc plochy.



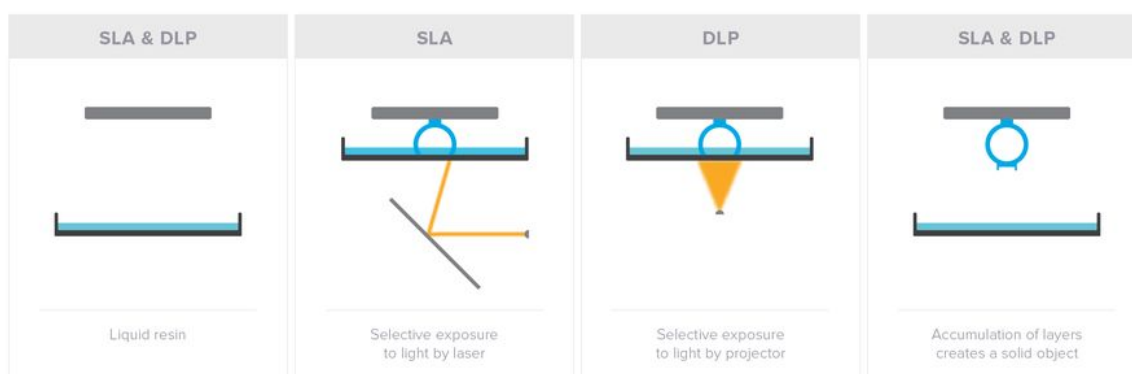
Obrázek 2: Trojúhelníkové plochy STL souboru (13)

2 Aditivní technologie

2.1 SLA - Stereolitografie

Stereolitografie je laserová technologie využívající tekutou fotopolymerní pryskyřici citlivou na UV záření. Ultrafialový laserový paprsek přechází přes povrch pryskyřice a selektivně zpevňuje materiál dle průřezu výrobku, přičemž vyrábí 3D díl odspodu nahoru. Nutné podpěry pro převisy a dutiny jsou generovány automaticky a později manuálně odstraněny (9).

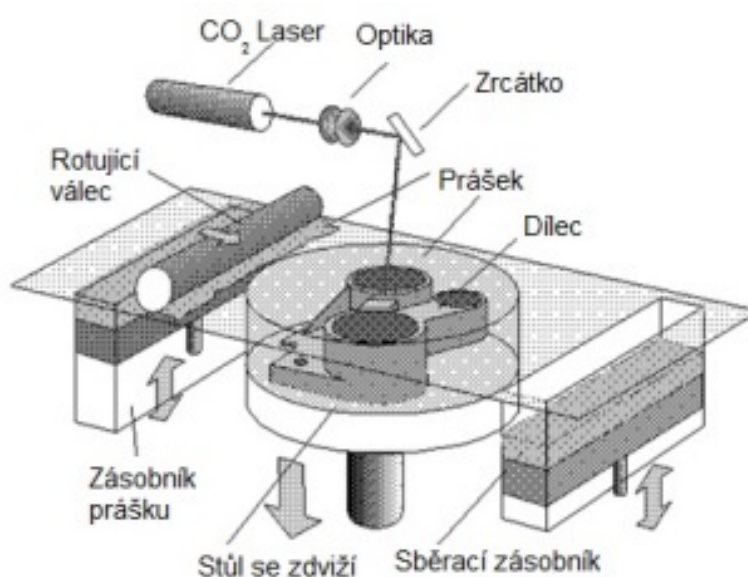
3D tiskárny se SLA technologií používají spotřební materiál na bázi fotopolymerních pryskyřic. Pomocí výkonného laseru a jeho světelného paprsku dochází ke změně fáze kapalného stavu materiálu, na fázi pevnou. Pro aktivaci fotopolymerní reakce jsou dva způsoby. Prvním z nich je vykreslování objektu pomocí laseru vrstvu po vrstvě, tu nazýváme stereolitografií (SLA). Druhým způsobem je promítání jednoho snímku v každé vrstvě objektu pomocí digitálního světelného projektoru, tento proces nazýváme Digital Light Processing (DLP). Tato technologie je oproti SLA rychlejší a to díky promítání celého snímku v jedné vrstvě. Hlavní nevýhodou SLA a DLP procesu je, že při prosvícení celé nádoby s fotopolymerní tekutinou začne po čase tekutina degradovat - je znehodnocena (10) (11).



Obrázek 3: Rozdílnost tisku (17)

2.2 SLS - Selective Laser Sintering

V této metodě se sice využívá levný vstupní materiál, ale cena pořizovacího stroje je vysoká. Technologie byla vyvinuta vědci na Texaské univerzitě v Austinu v polovině osmdesátých let. V praxi se setkáme s pojmem „sintrování“, který nahrazuje doslovný překlad SLS – selektivní spékání laserem. Polyamidový prach je po tenkých vrstvách tloušťky cca 0,1mm postupně spékán na každé z ploch řezu dle digitálního modelu vysoce výkonným laserem. To znamená, že stroj přehřeje materiál na teplotu přibližnou bodu tání, aby laser byl schopen využít veškerou energii ke spékání dané vrstvy. Jakmile je vrstva osvětlena laserem, posune se stavěcí platforma o jednu tloušťku nanesené vrstvy níž. Následuje znovu nanesení vrstvy a tento cyklus se opakuje tak dlouho, než je takto zhotoven finální výrobek. Lze využívat polyamidové prášky z různých druhů materiálů, jako jsou plast, sklo a kov. Výhodami je eliminace potřeby dočasných podpor při výrobě dílců. SLS dokáže vytvořit výrobky velmi složitých tvarů ve srovnatelné kvalitě, jako jsou výrobky vyrobené konvenčními technologiemi, jakými jsou například slévání nebo kování. Nevýhodou této metody je velká prašnost, hořlavost prášku, nízká recyklace – 30 % použitého prášku a 70 % nového, tím způsobený i velký odpad. V této metodě se využívá levný



Obrázek 4: Schéma 3D tiskárny pro SLS (48)

vstupní materiál se samonosnými stavebními vlastnostmi, které nepotřebují podpůrné struktury. Cena pořizovacího stroje a celkové náklady na tisk jsou vyšší (12) (13) (14) (15).

2.3 SLM - Selective Laser Melting

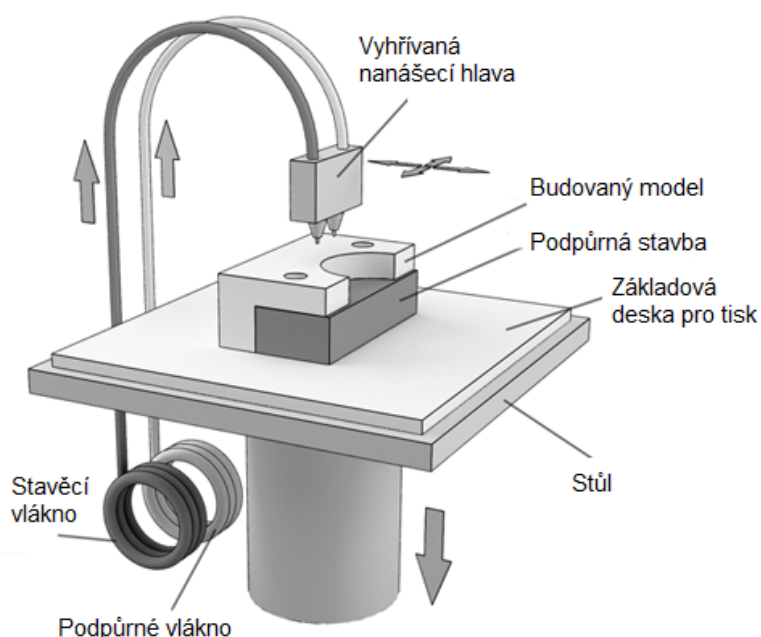
Technologie Selective Laser Melting (SLM) umožňuje vyrábět prototypové díly, testovací vzorky s vnitřní strukturou nebo náročnou geometrií. Tvarově složité díly, které jsou obtížně vyrobitelné nebo i nevyrobitelné konvenční technologií, lze vyrobit metodou SLM. Dílec je vytvářen postupným nanášením práškového kovu v tenkých vrstvách, ty jsou postupně spékány laserovým paprskem s vyšším výkonem než u technologie SLS. Tímto se vytváří homogenní kovové díly přímo na základě 3D CAD modelu a jejich dat. Stavba dílu v uzavřené tiskárně probíhá v inertní atmosféře N₂, díky které je možné zaručit čistotu zpracovaného materiálu. Při výrobě jednotlivých vrstev dílu dochází k plnému protavení materiálu, čímž lze dosáhnout hustoty až 99,9 %. Toto také vystihuje doslovný překlad SLM - selektivní laserové tavení kovového prášku. Vysoká přesnost vyrobených dílů, rychlost a hospodárnost jsou velice progresivními předpoklady pro rychlý vývoj a uplatnění této technologie. Výběr kovových prášků pro využití jsou nerezové oceli, nástrojové oceli, kobalt – chrom nebo mnohdy využívané super slitiny, zde se využívá interní plyn dusík. Při kombinaci inertní atmosféry jako je Argon umožňuje pracovat i s reaktivními kovovými prášky ze slitin hliníku nebo titanu. Z toho vyplývá, že nákladovost provozu této technologie je z důvodu pořizovacích cen slitin a používaného plynu N₂ je velmi vysoká (16) (17) (18).

2.4 FDM - Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling (FDM) patří mezi technologie aditivní výroby. Do tiskáren s touto technologií je materiál dodáván ve formě struny namotané na cívce. Struna z cívky se přivádí a do vytlačovací hlavy odkud pomocí trysky probíhá nanášení v ultra tenkých vrstvách. Tisková hlava se pohybuje v rovině X a Y. Pokud je vrstva dokončena, hlava se pohne ve vertikálním směru Z ve vzdálenosti tloušťky vrstvy, která byla právě nanесena. Tímto způsobem se provádí nanášení vrstev celého modelu vrstvu po vrstvě, než dojde k dokončení tištěného modelu. Při tisku

jsou použity dva materiály, jeden se používá k vytvoření geometrie modelu a druhý pro stavbu podpůrných struktur. FDM technologie je vhodná pro pevné, tvarově stálé mechanické modely bez požadavku na kvalitu povrchu. Není vhodná pro subtilní konstrukce. Termoplastické díly jsou odolné na působení tepla, chemikálií, vlhkých nebo suchých prostředí a na mechanické namáhání (3) (20) (21).

Tisk 3D modelu je započat vytvořením návrhu modelu v CAD softwaru, který je převeden do formátu STL. V softwaru pro 3D tiskárnu se nastaví veškeré parametry od tloušťky jedné vrstvy, způsobu vyplnění modelu, počet kontur, rozložení podpůrných struktur, počet kopií až po zvolení vhodného měřítka. Je předdefinována pozice pro ustavení objektu ve stavební komoře při následném tisku. Veškeré nezbytné podpůrné konstrukce jsou automaticky detekovány a generovány. V posledním kroku program model rozdělí do tenkých vodorovných 2D vrstev. Tloušťka vrstvy závisí na zvoleném materiálu a na průměru trysky. Software provede kontrolu a vygeneruje automaticky dráhu nástroje pro tisk. Používají se převážně tyto materiály: ABS, PLA, PC-ABS, ULTEM 9085 a nově i ULTEM 1010 (3) (20) (21).



Obrázek 5: Schéma 3D tiskárny pro FDM (49)

Nejběžnější náplní 3D tiskáren je termoplastický materiál ABS, který je dostatečně tuhý a zároveň je schopný odolávat nízkým i relativně vysokým teplotám nebo některým druhům chemie. Dalším oblíbeným materiálem je plast PLA, tato náplň je velmi rozšířená mezi 3D tiskárnami pro hobby účely. Zpracování tohoto druhu

plastu je rychlejší, snadnější než u materiálu ABS a zároveň neodolává tepelným změnám. Oproti ABS jsou výrobky z PLA ekologicky šetřené, jsou vyrobeny z biologicky odbouratelných zdrojů. Nejpoužívanější barvy pro materiály jsou bílá, černá, modrá, zelená nebo přírodní. Hlavním rozdílem použití těchto nejběžnějších materiálů je, že jsou především určeny pro technologii Fused Filament Fabrication (FFF), která se od technologie FDM prakticky neliší. Rozdílem FFF a FDM je takový, že FDM si v roce 1992 patentovala firma Stratasys, proto je FFF používáno v rámci Rep Rap (22) (23).

Výhody FDM technologie

FDM technologie je využívána při výrobě funkčních dílů, neboť výhodou při využití materiálu ABS je možnost vyrobit plně funkční části, které dosahují až 85 % pevnosti skutečně vyráběného dílu. Proto je velmi využívána při vývoji výrobků, které vyžadují rychlou výrobu prototypů pro testování a inovaci funkčnosti (3) (20) (21).

FDM technologie má efektivní využití materiálu s minimálním odpadem oproti ostatním technologiím. FDM proces využívá pouze materiál potřebný pro stavbu samotného modelu a podpurných struktur. Jediný odpad vzniká při dočišťování nebo odstraňování podpurného materiálu. Podpurnou konstrukci vytvořenou v průběhu tisku u materiálu ABS, PC – ABS a dalších, lze odplavit nebo snadno odlomit (3) (20) (21).

Další výhodou je rychlá změna materiálu. Materiály jsou dodávány v plechových boxech ve formě tenké struny navinuté na cívce, které umožňují snadnou manipulaci při doplňování nebo výměně materiálu (3) (20) (21).

Nevýhody FDM technologie

Jednou z nevýhod FDM technologie je omezená přesnost. Díly postavené touto technologií mají omezenou přesnost vzhledem k podobě použitého materiálu ve formě vlákna (3) (20) (21).

Další nevýhodou FDM technologie je pomalý proces. Stavební proces je pomalý, z důvodu vyplnění celé plochy příčného průřezu stavebním materiálem. Rychlost stavby je omezena rychlostí vytlačování nebo průtoku stavebního materiálu z vytlačovací hlavy. Jelikož jsou stavebním materiálem plasty s vysokou viskozitou, výrobní proces nelze urychlit (3) (20) (21).

3 Zvolené tiskové materiály

3D tiskárny pracují s celou škálou nejrůznějších materiálů, které se liší svým složením, pevností, křehkostí, dostupnými barvami i mnoha dalšími vlastnostmi. Každá z technologií užívá jiné materiály. V současnosti nejrozšířenější technologie FDM tiskne z ekologického PLA, plastů ABS nebo ABS plus. Tisknout lze i ze sádrového kompozitu, fotopolymeru nebo dokonce kovu. Vybrané tiskové materiály pro BP byly zvoleny na základě svých vlastností, jako je pevnost, teplotní a chemická odolnost (22).

3.1 Materiály pro SLA technologii

3.1.1 Durable

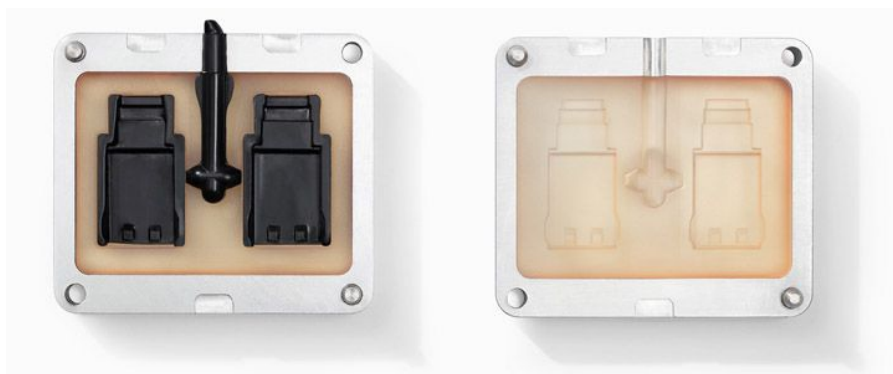
Materiál Durable je fotopolymerní pryskyřice, která je podobná polypropylenu s podobně nízkým modulem pevnosti, houževnatosti a vysokou rázovou tuhostí. Využívá se díky své odolnosti proti opotřebení, tvárnosti, a také pro díly s hladkým a lesklým povrchem. Firmou Formlabs je tento materiál určen pro tiskárny Form 1 a Form 2. Materiál je lehce zbarven do zelené barvy (23).



Obrázek 6: Durable - pouzdro na ubrousky (30)

3.2 High Temp

High Temp je fotopolymerní pryskyřice, která má využití pro vysokoteplotní aplikace. Její teplotní deformace je při teplotě 289 °C a zatížení 0.45 MPa. Tyto hodnoty jsou nejvhodnější pro vysokoteplotní aplikace s malým namáháním, kde není kladen důraz na flexibilitu. Je vhodná pro statické aplikace a je schopna odolat velmi vysokým teplotám, může být tedy využita ve výrobních procesech například u vstřikování plastů, nízkotlakého lití, tváření a formování za tepla. Materiál má přírodní zbarvení, pochází od firmy Formlabs (24).

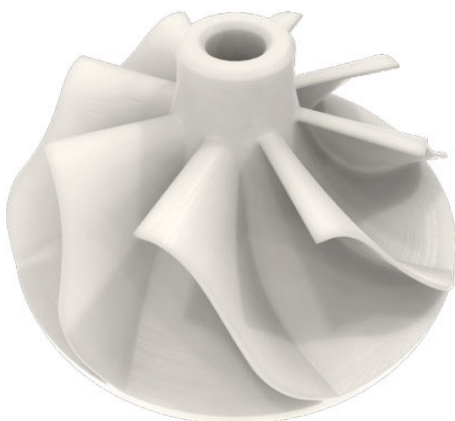


Obrázek 7: High Temp - Forma pro lití (32)

3.3 Materiály pro SLS technologii

3.3.1 PA 2200

PA 2200 je jemný prášek vyrobený na bázi polyamidu 12, který poskytuje velmi vyvážené vlastnosti, které se využívají pro konvenční vstřikovací materiály. Vznikají díly s nejvyšší kvalitou, s plně funkčními komponenty a biokompatibilitou materiálu, jakož i s vysokou odolností proti opotřebení. Upotřebení tohoto materiálu je při realizaci pohyblivých částí spojů. Materiál je čistě bílý (25) (26).



Obrázek 8: PA 2200 – Turbína (39)

3.3.2 PA 3200 GF

Materiál PA 3200 GF je stejně jako PA 2200 polyamid 12, avšak PA 3200 je s příměsí 30 % skla. Vyznačuje se vysokou tuhostí, tepelnou odolností a nízkým opotřebením. Využívá se v automobilovém průmyslu při výrobě částí motorů, v leteckém průmyslu zvláště tam, kde je kladen důraz na speciální tuhost a vysokou odolnost s nízkým opotřebením. Materiál je světle šedivý (26) (27).



Obrázek 9: PA 3200 GF - Díl karburátoru (40)

3.4 Materiál pro FDM technologii

3.4.1 ULTEM 1010

ULTEM 1010 je amorfní termoplastický materiál - polyetherimid (PEI). Tento materiál je určen pro produkční typy 3D tiskárny jako jsou Fortus 400mc, 450mc a 900mc od firmy Stratasys. V současnosti se jedná o nejlepší termoplastický materiál pro technologii FDM. ULTEM 1010 je vysoce výkonný polymer, který poskytuje vynikající tepelnou i chemickou odolnost a nejvyšší pevnost v tahu.

Díky těmto vlastnostem je ho možné využívat tam, kde ostatní materiály nelze využít pro jejich nízkou odolnost. Využívá se převážně v leteckém a automobilovém průmyslu. Certifikovaný stupeň tohoto materiálu označovaný CG je biokompatibilní a schválený pro styk s potravinami NSF 51 a ISO 10993 / USP Class VI certifikací, mezi FDM materiály. Barva termoplastu ULTEM 1010 se podobá barvě surového dřeva (28) (29) (30) (31).



Obrázek 10: ULTEM 1010 – Nátrubek (44)

4 3D Tiskárny

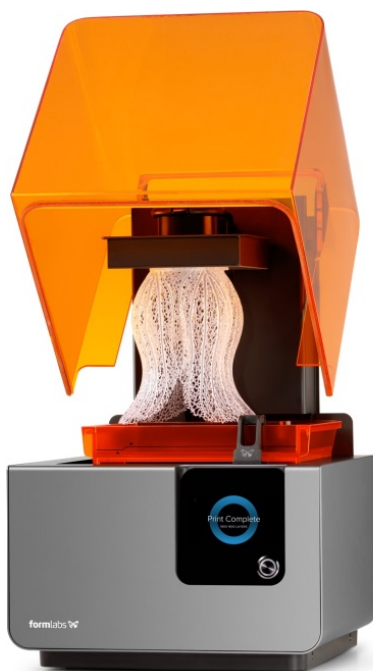
3D tiskárny je možné rozdělit podle mnoha různých kritérií. Dělí se podle technologie, jakou zhmotňují 3D model a to SLA, SLS a FDM. Dále je možné je dělit na stolní a průmyslové, otevřené a uzavřené, hobby a profesionální (2) (32).

4.1 Zvolené druhy 3D tiskáren

K 3D tisku tlakové nádoby byly použity technologie RP, které jsou k dispozici v laboratoři prototypových technologií a procesů na TUL. Jedinou nedostupnou technologií je SLS, která byla zajištěna kooperací.

4.1.1 Tiskárna pro SLA technologii – Form 2

Jedná se o 3D tiskárnu od firmy Formlabs. Zařízení pracovní komory má velikost 145 x 145 x 175 mm. Na této tiskárně byly vyrobeny vzorky č. 2 a 4 laserovým světlem z materiálových pryskyřic Durable a High Temp. Form 2 se zaměřuje na výrobu objektů s velmi vysokou úrovní detailu nebo se složitými kresbami a možností nastavení výšky vrstvy 0,025 mm – 0,1 mm. Pořizovací cena se pohybuje okolo 110 000 Kč (33).



Obrázek 11: Tiskárna Form 2 (46)

4.1.2 Tiskárna pro SLS technologii – Eosint P 385

Vzorky z materiálů PA 2200 a PA 3200GF byly tištěny v externí firmě na stroji Eosint P 385. tato 3D tiskárna je od firmy EOS, pracuje s technologií SLS, která je schopna vyrobit díly o maximální velikosti 330 x 330 x 620 mm za pouhých 24 hodin. Prášek je možný nanášet na stavební platformu po vrstvách 0,1 až 0,15 mm a každá vrstva je vytavena pomocí CO2 laserového paprsku. Větší součásti je nutno sestavit z více dílů. Pořizovací cena této 3D tiskárny je přibližně 360 000 EUR (34) (35) (36) (37).

4.1.3 Tiskárna pro FDM technologii - Fortus 450mc



Obrázek 12: 3D Tiskárna EOSINT P 385 (47)

Tisk modelů z materiálu ULTEM 1010 technologií FDM, byl proveden na stroji Fortus 450mc. Tento stroj vyrobený firmou Stratasys disponuje pracovní komorou, kde lze vytvářet fyzické dílce o maximálních rozměrech 406 x 355 x 406 mm technologií FDM. Stroj je vybaven dvěma boxy pro stavební materiál a dvěma pro podpůrný materiál. Tyto dva a dva boxy jsou vzájemně propojeny pro možné napojení tavné materiálové struny, aby nedošlo k přerušení tisku. Tiskárna je vybavena zásobníkem pro uložení čtyř boxů, každý s obsahem 1510 cm³ termoplastu, takže Fortus 450mc je schopný tisknout nepřetržitě po dobu dvou týdnů bez doplnění. Výběr trysky pro zvolený materiál je daný tloušťkou jednotlivých trysek. Od nejtenčí

trysky s označením T10, která je vhodná pro plasty například ABS, PC, PC-ABS a umí nanášet vrstvu o tloušťce 0,127 mm. Nejsilnější tryska je s označením T20, která tvoří tloušťku vrstvy 0,333 mm. Při použití ULTEM 1010 lze využít nejtenčí trysku T14 s tloušťkou vrstvy 0,254 mm pro stavební materiál a pro podpurný materiál trysku T16 s tloušťkou vrstvy 0,254 mm (34).



Obrázek 13: 3D tiskárna Fortus 450mc (34)



Obrázek 14: Výměna materiálových boxů (50)

5 Návrh 3D modelu – expanzní nádoby

5.1 Předpisy projektu FSAE

Formulová soutěž technických univerzit se jela poprvé v USA v roce 1978. Tam je dodnes používán název Formula SAE (FSAE). Do Evropy dorazila o hodně let později, přibližně roku 1998, s označením Formula Student (40).

Zabývali jsme se pravidlem T8 – Omezení chladicí kapaliny a těsnění systému, pro chlazení motorů musí být použita pouze voda, nemrznoucí kapaliny na bázi glykolu a jiná aditiva jsou zakázána. Expanzní nádoba musí být uzavřena a utěsněna, každá tato nádoba musí mít minimální objem 10 % celkového objemu kapaliny v chladicím systému. Taková to záchytná nádoba musí být schopna pojmout vroucí tekutinu bez jakékoli deformace, musí být umístěna za protipožární přepážkou směrem dozadu pod úrovní řidičových ramen. Nesmí být přichycena pásky ani lepenkou, ale pevným držákem k rámu vozu (40).



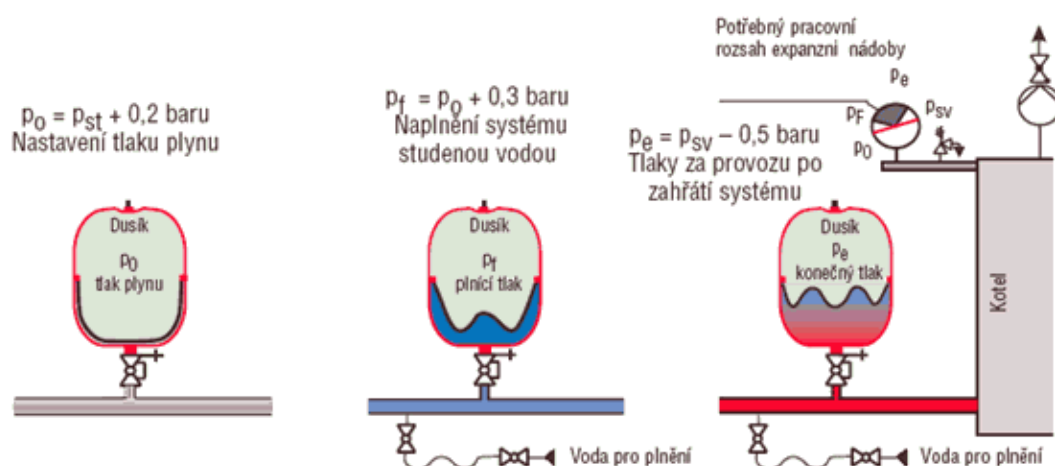
Obrázek 15: Monopost Eliška - příprava usazení expanzní nádoby dle pravidel

5.2 Tlaková expanzní nádoba

Tlakové expanzní nádoby slouží pro vyrovnávání změn objemu různých druhů kapalin způsobených změnou jejich teploty a zároveň udržují přetlak v soustavě v předepsaných tolerancích. Používají se v automobilovém průmyslu u motorů aut,

v topných systémech, v solárních systémech a v okruzích s pitnou vodou při použití zásobníkových ohříváčů. Pro automobilový průmysl jsou nádoby vyrobeny z plastu a pro topné okruhy z nekorozivních materiálů jako je nerez, bronz, mosaz nebo z kvalitního hlubokotažného ocelového plechu, který je opatřený antikorozií povrchovou úpravou. V kovových nádobách jsou oproti plastovým velmi elastické nepropustné membrány odolné vůči vysokým teplotám.

Součástí expanzní nádoby by měla být i uzavírací armatura, která zaručí bezpečnou výměnu vody v nádobě. Konstrukce takovýchto nádob je navržena na pracovní tlak 10 barů. Membrána v nádobě pracuje tak, že z jedné strany působí vyrovnávací plyn a z druhé strany kapalina. Ve studeném stavu je skoro celý objem nádoby vyplněn plynem a při nárůstu teploty v soustavě se zvětšuje objem a tlak kapaliny, která vstupuje do expanzní nádoby a zároveň stlačuje plyn na druhé straně membrány. Naopak při poklesu teploty je kapalina vytlačena plynem zpět do okruhu (35) (36) (42) (43).



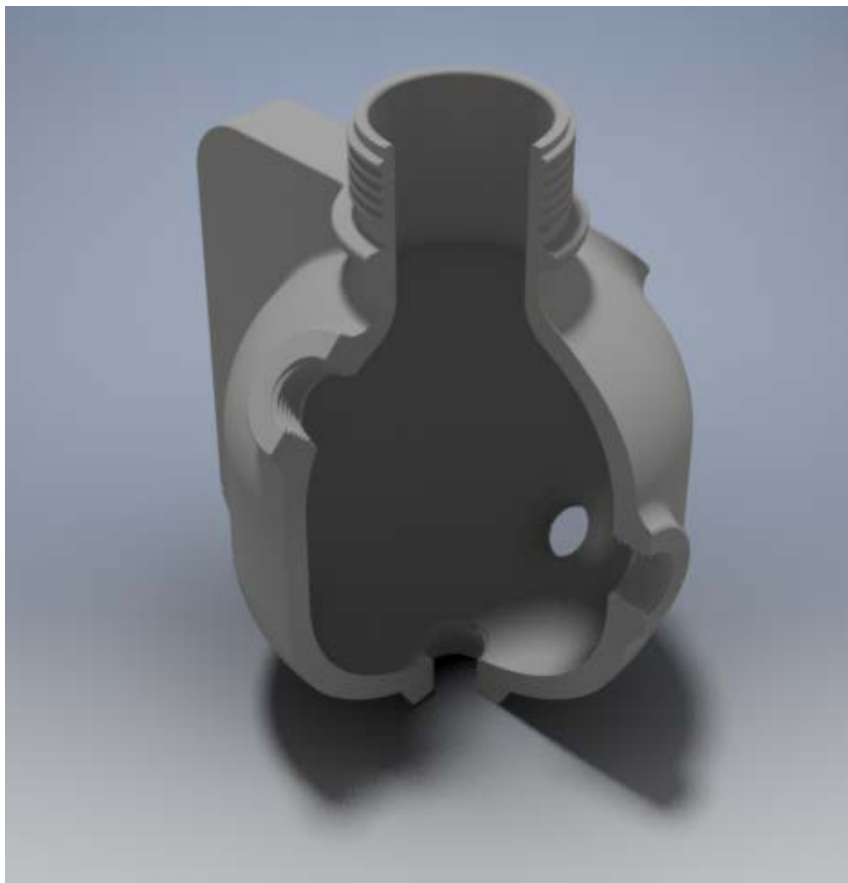
Obrázek 16: Provoz expanzní nádoby (54)

5.3 Požadavky

S ohledem na pravidla FSAE byla požadována přesnost výroby kvůli možnému utěsnění vodoznaků a samotné nádoby. Při teplotním a tlakovém namáhání, okolo 100 °C a 10 barů nesmí dojít k porušení závitů ani jednotlivých vrstev nádoby. V rámci porovnání různých druhů technologií výroby byl ještě přidán požadavek na design, tak aby uvnitř nádoby nevnikali při tisku technologií FDM z materiálu ULTEM 1010 podpůrné struktury, nebylo by možné je odstranit. ULTEM 1010 má i své nevýhody, disponuje nerozpustnou podpůrnou strukturou.

5.4 Návrh 3D modelu expanzní nádoby – Preprocessing

Na základě informací popsanych výše, byl vytvořen CAD model dílu expanzní nádoby. Model byl vytvořen v softwaru Autodesk Inventor 2017. Návrh odpovídá pravidlům dle SAE a požadavkům konstrukce monopostu. Design nádoby byl navržen pomocí podobnosti kapky vody a byl přizpůsoben do tvaru vertikálního elipsoidu. Díky tomuto tvaru docílíme při tisku dutý vnitřek nádoby bez podpor.



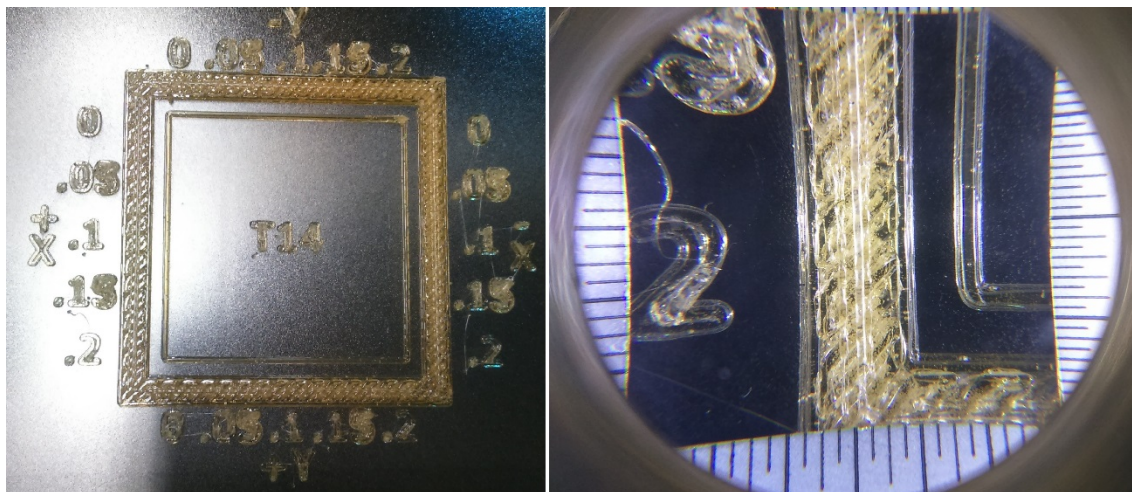
Obrázek 17: Model Expanzní nádoby z CAD softwaru

5.5 Tisk 3D modelu expanzní nádoby – Processing

Pro vytvoření expanzní nádoby byla vybrána technologie tisku FDM a materiál ULTEM 1010, který je novinkou na trhu. Vytisknuté vzorky technologií SLA a SLS byly pouze pro porovnání.

5.5.1 Nastavení tiskárny Fortus 450mc a průběh tisku

Prvotně bylo nutné vyměnit na stroji aktuálně použitý materiál, výměna trysek pro námi požadovaný ULTEM 1010. Dále je nutné ponechat stroj zahřát na provozní a funkční teplotu – jedná se o provozní teplotu komory a trysek. Po tomto procesu následuje kalibrace stroje, vytištěním kalibračních vzorků (obrázek 17). Poslední částí kalibrace je úprava technologických parametrů, dle kalibračního výtisku.

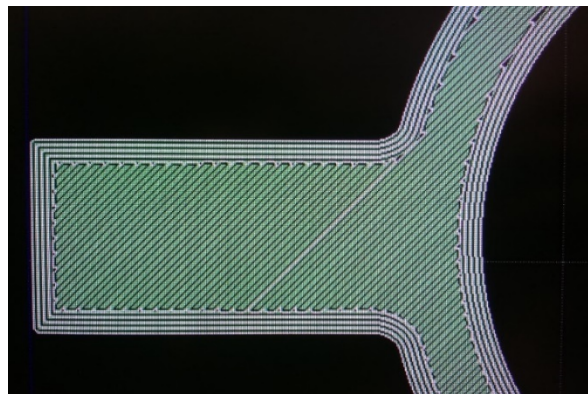


Obrázek 18: Kalibrační vzorek a jeho detailní informace

V programu pro 3D tiskárnu byly upraveny (Insight) podpůrné struktury a nastavení jedné kontury pro vzorek č. 0 (obrázek 18) a pro vzorek č. 1 byly nastaveny kontury tři (obrázek 19), tloušťka vrstvy byla nastavena na hodnotu 0,25 mm. Tisk trval přibližně 17hodin, bylo spotřebováno 303 cm³ nosného materiálu a 75 cm³ materiálu pro podpůrné struktury.



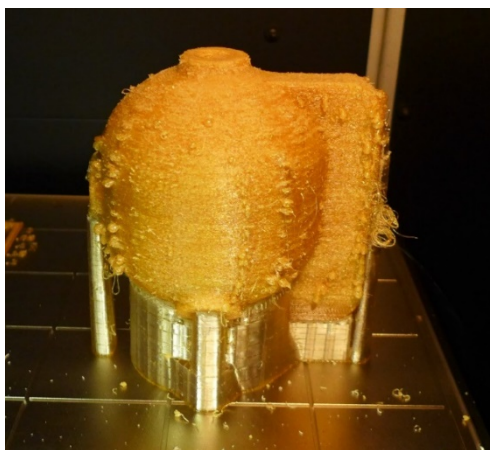
Obrázek 18: Přerušení tisku – ukázka kontur



Obrázek 19: Nastavení více kontur

5.5.2 Tisk FDM technologií

Pro tisk vzorků č. 0 a č. 1 byla zvolen termoplastický polymerní materiál ULTEM 1010, který odolává vysokým teplotám a mechanickému namáhání, které jsou potřebné pro tlakovou expanzní nádobu. Při prvním pokusu tisku tlakové nádoby se vytiskl „zmetek“. Při analýze neúspěchu byl zjištěn nedostatek v podobě vysoké vlhkosti zpracovaného materiálu. Tento nedostatek se projevil nesprávným napojením jednotlivých tištěných vrstev tvořeného modelu.



Obrázek 19: Znehodnocený vzorek

Po vytištění a vyjmutí z 3D tiskárny byl vzorek nepoužitelný. Modelový materiál v zásobníku tiskárny byl vyměněn za nový a celý proces byl nastaven a spuštěn znovu. Následující tisk trval 16 hodin 42 minut a proběhl bez komplikací. Podobně byl vytištěn vzorek č. 1, kterému byla předdefinována hustší kontura.



Obrázek 20: Vzorek č. 0.

5.5.3 Tisk SLA technologií

5.5.4 Nastavení tiskárny Form 2 a průběh tisku

U materiálu Durable, 3D tisk probíhal ve velikosti vrstvy 0,05 mm, doba tisku dané součásti byla 53hod.

Vzorek č. 4 z materiálu High Temp trvalo vytisknout pouze 33hod při stejné tloušťce vrstvy jako vzorek č. 2 z materiálu Durable.



Obrázek 22: Model vzorku č. 2 -
Durable



Obrázek 21: Model vzorku č. 4 - High
Temp

5.5.5 Tisk SLS technologií

Tuto technologii nebylo možné provést v laboratořích TUL, proto na výrobu vzorku č. 3 z práškového materiálu PA 2200 a vzorku č. 5 z materiálu PA 3200GF byla po-
ptána externí firma. Tloušťka vrstvy byla 0,1 mm a cena každého vzorku činila 6 934 Kč bez DPH.

5.6 Operace po tisku – Postprocessing

Po tisku následuje postprocessing, kde po dokončení procesu tisku bylo nutné vy-
jmout vzorek ze stroje. Dle technologie bylo nutné, nechat tisknuté vzorky vychlad-
nout nebo provést následně vytvrzení pomocí UV záření.

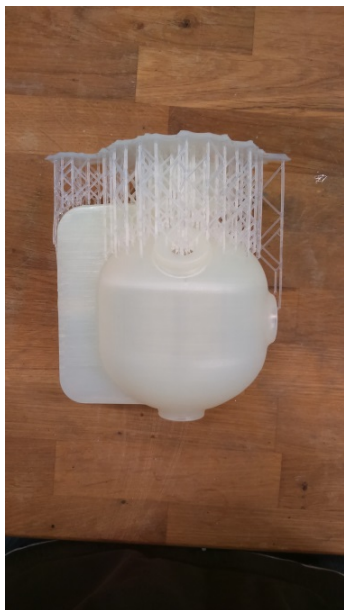
5.6.1 Odstraňování podpůrných struktur FDM technologie

Vzorky č. 0 a 1 vytvořené technologií FDM byly vyjmuty z 3D tiskárny Fortus 450mc. Celý vytištěný vzorek byl pevně připevněn k pracovní podložce, k jejímuž oddělení byl využit skalpel. K odstraňování větší části podpůrného materiálu bylo nutno využít speciálních háčků, kleští, sekáče, paličky a sady závitníků M16 x 1,5. Podpůrný materiál mezi závity nebylo možné touto cestou odstranit, proto bylo nezbytné přejít k zahřátí modelu. Po zahřátí na 170 - 180 °C v laboratorní peci došlo ke snadnému oddělení zbylého podpůrného materiálu od vytištěného modelu. Do této doby se oba materiály jevily jako jeden, podpora byla spojena se stavebním materiálem. Po opakovaném zahřátí vzorků bylo možné očistit veškeré vnější podpory i z oblasti vnějšího závitu pro víko nádoby.



Obrázek 23: Proces odstraňování podpůrných struktur

5.6.2 Odstraňování podpurných struktur SLA technologie



Obrázek 24: Vzorek č. 2 - Durable



Obrázek 25: Vzorek č. 4 - High Temp

Vzorky č. 2 a č. 4 z materiálů Durable a High Temp byly vytvořené technologií SLA na 3D tiskárně Form 2. Na fotografiích 23 a 24 můžeme vidět vzorky po vyjmutí z 3D tiskárny a následné fázi vytvrzení. Podpory jsou vždy ze stejného materiálu jako daný vzorek, podpory byly nejprve odstraněny štípacími kleštěmi a následně vylámaný šroubovákem uvnitř nádoby. Po vylámaní bylo možné zbylé podpory vytáhnout pomocí zahnutých kleští krs největší otvor. Podpory materiálu High Temp byly o něco pevnější než u materiálu Durable a tak bylo očišťování vzorku obtížnější a zdlouhavější. Poslední fází bylo začištění závitů pomocí závitníků M16 x 1,5.



Obrázek 27: Odstraňování podpor vzorku č. 2



Obrázek 26: Odstraňování podpor vzorku č. 4

5.6.3 Odstraňování podpůrných struktur SLS technologie

Tyto vzorky byly vyrobeny technologií SLS, která nepotřebuje při tisku vytvářet podpůrnou strukturu. Každý ze vzorků stačilo pouze vyfoukat stlačeným vzduchem a dočistit už tak velmi přesně vytištěné závity M16 x 1,5.



Obrázek 28: Vzorek č. 3 - PA 2200 a vzorek č. 5 - PA 3200 GF

6 Experimentální část



Obrázek 29: Jednotlivé vzorky před zkouškami

6.1 Zkouška tlakem – 1.

Abychom mohli takovýto pokus vůbec uskutečnit, muselo se dbát především na bezpečnost. Nádoba byla v jednotlivých závitech utěsněna šrouby M16 x 1,5 a největší otvor pro víčko byl utěsněn pryžovým špuntem. Do nádoby byla namontována hadice, která byla propojena s ventilem od rozvodu vzduchu v laboratoři. Takto připravený vzorek byl dán do pracovní svěrky a vše bylo důkladně přikryto pevnou plastovou bednou, která byla zatížena pytlíkem písku. Po této přípravě mohlo dojít k postupnému tlakování vzorků. Tlak v nádobě byl postupně zvyšován po 2 barech až na hodnotu 10 barů, v tom okamžiku byl pokus přerušen a nádoba odvzdušněna. Celý proces probíhal za dohledu proškolených pracovníků a vedoucího BP.



Obrázek 30: Vzorek č. 2 připraven k tlakové zkoušce

Vzorek č. 0. byl vyroben technologií FDM v 3D tiskárně Fortus 450mc z materiálu ULTEM 1010, před výrobou byla zvolena jedna kontura vyplňování vrstvy.



Obrázek 31: Vzorek č. 0. po tlakové zkoušce

Vzorek č. 1. byl vyroben technologií FDM v 3D tiskárně Fortus 450mc materiálu ULTEM 1010, před výrobou byly zvoleny tři kontury vyplňování vrstvy z důvodu lepšího utěsnění mezi vrstvami.

Vzorek č. 2. byl vyroben technologií SLA v 3D tiskárně Form 2 z materiálu Durable, vyznačuje se svojí houževnatostí, ale vysokým teplotním vlivům neodolává. Tento materiál je vhodný používat do teplot okolo 45 °C.

Vzorek č. 3. byl vyroben technologií SLS v 3D tiskárně EOSINT P 385 z práškového materiálu PA 2200.

Vzorek č. 4. byl vyroben technologií SLA v 3D tiskárně Form 2 z materiálu High Temp, tento materiál se vyznačuje vysokou teplotní výdrží, která je až 289 °C při 0,45 MPa.

Vzorek č. 5. byl vyroben technologií SLS v 3D tiskárně EOSINT P 385 z materiálu PA 3200GL, který má příměs skla.

6.2 Teplotní zkouška

Teplotní zkouška byla prováděna z důvodu průtoku tekutiny nádobou při chodu motoru na formuli student. Teplota tekutiny se bude pohybovat okolo 100 °C, našim cílem bude vyhodnotit, který vzorek vydrží teplotu 110 °C po dobu 12 hodin v laboratorní peci. Po vyjmutí z pece necháme vzorky vychladnout a přejdeme k další zkoušce tlakem.



Obrázek 32: Vzorky před teplotní zkouškou

6.3 Zkouška tlakem – 2.

Tato zkouška tlakem se nelišila od předešlé, viz 6.1. Cílem této zkoušky bylo zjistit, jestli nemohlo dojít k degradaci nebo porušení některého ze vzorků díky předešlým zkouškám.



Obrázek 33: Vzorek č. 4 po 2. tlakové zkoušce

7 Zhodnocení

Pro vytvoření jednotlivých dílů byly použity různé technologie výroby (SLA, SLS, FDM). Jedním z cílů této bakalářské práce bylo teoreticky i prakticky zjistit, zda je vhodná technologie 3D tisku pro výrobu expanzní nádoby, která je namáhána jak teplotně tak i mechanicky. Bylo nutné na základě zvolených technologií vybrat dostupné materiály, které splňují zmíněná kritéria na požadavky, tedy velkou teplotní výdrž a zároveň mechanickou odolnost.

Pro technologii FDM byl vybrán amorfnní termoplastický materiál ULTEM 1010, který je schopný odolat jak teplotnímu tak i mechanickému namáhání. U těchto vzorků jsme se převážně soustředili na přesnost výroby, aby při tlakovém testu u vzorků nedocházelo k propouštění vzduchu mezi tištěnými vrstvami nebo obtékání v oblasti závitových spojů. Tato teorie se následně prokázala při samotném testu. U vzorku č. 0 se už při tlaku dvou barů projevil větší únik vzduchu nepatrným otvorem, který vznikl nedokonalým spojením mezi tištěnými vrstvami, viz Obrázek 30. Vzorek č. 1 obstál lépe díky zhuštění stěny třemi konturami, projevilo se však u většího tlaku obtékání vzduchu v oblasti závitů a vzorek bylo možné natlakovat pouze do hodnoty osmy barů. V teplotní zatěžovací zkoušce oba vzorky obstály.

U technologie SLA byly vybrány dvě velmi rozdílné pryskyřice, Durable a High Temp. Tato technologie je schopna tisknout tloušťku vrstvy 0,05 mm, tudíž přesnost výroby a spojení jednotlivých vrstev bude dobrá. Pro naše uplatnění vzorek z materiálu Durable nemá tak vhodné vlastnosti jako vzorek z High Temp, přesto při první zkoušce tlakem obstál, projevilo se pouze lehké obtékání vzduchu při vyšším tlaku. Byla provedena teplotní zkouška v laboratorní peci po dobu 12 hodin při zahřátí na 110 °C, následně byly vzorky ponechány ke zchladnutí na pokojovou teplotu. Přestože vzorek č. 2 má teplotní deformaci okolo 50 °C, tuto zkoušku neočekávaně obstál bez poškození. Po tomto procesu byla provedena druhá zkouška tlakem, kde se projevilo zkřehnutí vzorku č. 4, který se při tlaku osmy barů roztrhl, viz Obrázek 32.

Vzorky č. 3 a 5 vyrobené technologií SLS obstáli ve všech zkouškách výborně. Díky velké přesnosti výroby byly samotné závitů a těsnící plochy v oblasti závitů dokonale ploché a to nám umožnilo jako jediné vzorky natlakovat na hodnotu deseti

barů, bez jakéhokoliv úniku vzduchu. Na základě získaných výsledků z testů vytištěných šesti vzorků různými technologiemi s různými materiály, doporučuji výrobu expanzní nádoby technologií SLS z materiálů PA 2200, z důvodu menší hmotnosti, ačkoliv výsledky zkoumaných vzorků č. 3 a č. 5 byly vyhodnoceny shodně.

8 Závěr

V této bakalářské práci, která se věnuje konstrukčnímu návrhu expanzní nádoby pro vůz studentské formule, konstruované na TUL pro sezonu 2016/2017, bylo vytvořeno šest jednotlivých vzorků pomocí technologií RP. Dané technologie, SLA, SLS a FDM, se liší nejen použitím různorodých materiálů, ale i způsobem tisku.

Virtuální model nádoby byl navrhnout v CAD softwaru a fyzicky vyroben pomocí technologií RP. Jednotlivé vzorky byly zhotoveny, technologií SLA z materiálů Durable a High Temp, technologií SLS z materiálů PA 2200 a PA 3200 GF a technologií FDM z materiálu ULTEM 1010. Následně byly provedeny tlakové zkoušky, teplotní testy a po zchlazení znovu tlakové testy všech vzorků. Výsledky testů jsou shrnuty v příloze A.

U vzorků vyrobených z materiálu ULTEM 1010 technologií FDM bylo zjištěno, že u technologie FDM svým postupným nanášením vrstev. Tento jev může být zapříčiněn stejným místem startu tisku v jednotlivých vrstvách modelu.

Z experimentálních testů vyplývá, že tisk technologií SLA je časově náročnější ve srovnání s tiskem technologií FDM. Tisk SLA vzorku č. 2 z materiálu Durable trval 53 hodin, High Temp 33 hodin, v porovnání s technologií FDM s použitým materiálem ULTEM 1010 kde doba tisku trvala 17 hodin. Naopak v porovnání struktury tisku z technologie SLA a FDM byla struktura vzorků technologií SLA mnohem kvalitnější.

Časový horizont výrobního procesu vzorků č. 3 a č. 5, které byly vyrobeny technologií SLS nemůžeme bohužel porovnat, neboť tato data nejsou k dispozici. Tyto vzorky byly vyrobeny externí firmou.

Dle nejdůležitějších požadavků na vytvoření modelu expanzní nádoby, kterými jsou přesnost výroby, teplotní a mechanické namáhání bylo na základě výsledků testování šesti vzorků, předložen závěr, že nejvíce vyhovující požadavkům jsou vzorky č. 3 a č. 5 vyrobené práškovou technologií SLS. Rozdíl mezi těmito vzorky z pohledu našeho testování je pouze hmotnostní, nikoli kvalitní. Z tohoto důvodu byl vybrán vzorek č. 3 z materiálu PA 2200 pro účely výroby expanzní nádoby jako nejvíce vyhovující, který je i největším přínosem této bakalářské práce.

Použitá literatura

1. ADAM, Daniel. Nejmenší a nejlevnější profesionální 3D tiskárna Stratasys. In: *ISSN 1802-6168. Www.cad.cz[online]. Brno: MCAE Systems [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/component/content/article/3633.html>*
2. NOORANI, Rafiq. *Rapid prototyping: principles and applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2006. ISBN 0471730017.
3. CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2003. ISBN 9812381201.
4. 3D Tisk. In: *Www.3d-factory.cz [online]. Praha: 3d-factory.cz [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.3d-factory.cz/tisk>*
5. MASTNÝ, Gabriel. Technologie 3D tisku. In: *Itnetwork[online]. Praha: itnetwork, 2014 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>*
6. CHLEBO, Martin. Rychle stručně o 3D tisku, doma i ve světě. In: *Www.imanica.cz [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>*
7. 3D Tech. In: *Www.3dtech.cz [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>*
8. KOSLOW, Tyler. 11 Best Resin (DLP/SLA) 3D Printers 2017: Features. In: *All3dp.com [online]. 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>*
9. Stereolitografie. In: *Http://www.materialise.com [online]. Copyright Materialise 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/vyroba/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/stereolitografie>*
10. CHARKRAVORTY, Dibya. STL File Format for 3D Printing – Simply Explained: Basics. In: *All3dp.com [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>*

11. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/slm-technologie/>
12. *3d-tisk.cz* [online]. Nová média [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering>
13. Precision. Surface Finish. Speed. In: *Https://enviontec.com/* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://enviontec.com/>
14. *Pkmodel.cz* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dtisk.html>
15. *Eos.info.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
16. *Http://www.kolarkk.cz* [online]. Praha: Boris Kolář K&K [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.kolarkk.cz/index.php/slm/36-produkty/161-informace-o-slm>
17. *3dlaboratory.cz* [online]. Brno: 3dlaboratory, 2014 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
18. *Innomia.cz* [online]. webdesign and SEO eStudio, 2012 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>
19. *Http://www.objet.cz* [online]. Copyright © 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-fdm>
20. *Http://www.parlamentnilisty.cz* [online]. 3Dfactories, 2013 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.parlamentnilisty.cz/zpravy/tiskovezpravy/Novinky-a-zajimavosti-pro-3D-tisk-Tiskne-se-z-keramiky-dreva-i-bavlny-297609>
21. *Http://lawitm.com* [online]. 2013 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://lawitm.com/3d-printing-law-trademarks-why-fdm-isnt-for-everybody/>
22. *Http://www.parlamentnilisty.cz* [online]. 3Dfactories, 2013 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.parlamentnilisty.cz/zpravy/tiskovezpravy/Novinky-a-zajimavosti-pro-3D-tisk-Tiskne-se-z-keramiky-dreva-i-bavlny-297609>
23. *Materialy-k-3d-tisku*. In: *Https://trider.cz* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://trider.cz/materialy-k-3d-tisku>

24. *Support.formlabs.com* [online]. 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000086210-Using-Durable-Resin>
25. *Support.formlabs.com* [online]. 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000015650-Using-High-Temp-Resin>
26. <https://www.sculpteo.com/media/data/faq/pa2200-datasheet.pdf>
27. http://3d-prototip.si/wp-content/uploads/2014/04/MaterialData_PA_3200GF_en.pdf
28. *DataSheet PA 3200Gf. Eos*. Dostupné také z: http://3d-prototip.si/wp-content/uploads/2014/04/MaterialData_PA_3200GF_en.pdf
29. ULTEM 1010 3D print strong, stable parts. In: *Www.stratasys.com* [online]. Stratasys Ltd. © 2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-1010>
30. ULTEM™ 1010 3D PRINTING FILAMENT. In: *Www.3dxtech.com* [online]. Copyright 2017 3DXTech [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.3dxtech.com/ultem-1010-3d-printing-filament>
31. LEWIS, Jeff. Comparing ULTEM 1010 to ULTEM 9085. In: *Www.cadimensions.com* [online]. 2016 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.cadimensions.com/blog/item/165-comparing-ultem-1010-to-ultem-9085>
32. Printing-the-strongest-3d-parts-with-ultem-1010. In: *Blog.capinc.com/2015/04* [online]. 2015 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://blog.capinc.com/2015/04/printing-the-strongest-3d-parts-with-ultem-1010>
33. Form 2. In: *3Dwiser.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: https://3dwiser.com/3d-tiskarny/sla-dlp/formlabs-form-2/?gclid=CjwKCAjw7dfKBRA-dEiwAch0ega0oHGCsrhl1Y4iQoc8zQ6XGMG9CIRv5karmdY9oSVSpvDVbylbTwhoCAYgQAvD_BwE

34. Typy 3D tiskáren. In: *Www.makerslab.cz* [online]. Praha: MakersLab - Paralelní Polis, 2016 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.makerslab.cz/typy-3d-tiskaren>
35. Fantastická příležitost pro české strojařské firmy. In: *Https://www.zakazka.cz* [online]. © 2017 Zakazka.cz, 2014 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.zakazka.cz/fantasticka-prilezitimost-pro-ceske-strojarske-firmy/>
36. Laser sheet metal cutting, engraving and tube cutting. In: *Www.dok-ing.hr* [online]. © 2013 DOK-ING d.o.o. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: http://www.dok-ing.hr/services/industrial_services
37. EOSINT P 385. In: *Http://3d-prototyp.si* [online]. (c) 2017 3d prototyp [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: http://3d-prototyp.si/?page_id=546
38. 3D tisk. In: *Http://www.rapidprototyping.cz/* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.rapidprototyping.cz/3d-tisk/>
39. Fortus 380mc and Fortus 450mc. In: *Http://www.stratasys.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-380-450mc#content-slider-1>
40. FSAE. In: *Http://students.sae.org* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://students.sae.org>
41. Proč expanzní nádobu. In: *Http://www.regulus.cz* [online]. © Copyright Regulus s r.o. 2015-2017 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://www.regulus.cz/cz/expanzni-nadoby>
42. FOREJTEK, Jaroslav. Expanzní nádoby pro pitnou a teplou vodu. In: *Voda.tzb-info.cz* [online]. REFLEX CZ, 2005 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/2523-expanzni-nadoby-pro-pitnou-a-teplou-vodu>
43. Expanzní nádoby. In: *Https://www.topenilevne.cz* [online]. © 2007-2017 PROFI-UNION, spol. s r.o [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.topenilevne.cz/expanzni-nadoby-c1650/>
44. Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing. In: *Https://www.solidsolutions.co.uk* [online]. 2015 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z:

<https://www.solidsolutions.co.uk/blog/2015/04/preparing-SOLIDWORKS-models-for-3d-printing/#.WVLcTWg19aQ>

45. Visual_how_it_works. In: *Materialisecloudcdn.azureedge.net* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z:

https://materialisecloudcdn.azureedge.net/assets/img/tools/visual_how_it_works.png

46. SLA vs DLP. In: *Https://formlabs.com* [online]. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: https://formlabs.com/media/upload/_thumbs/SLA-v-DLP-process-graphic.jpg

47. In: *Https://static.formlabs.com* [online]. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: https://static.formlabs.com/static/formlabs-web-frontend/img/products/resin/engineering/durable/gallery/M_wipes.jpg

48. High Temp. In: *Https://support.formlabs.com* [online]. [cit. 2017-06-19]. Dostupné z: https://support.formlabs.com/hc/en-us/article_attachments/115000081290/hightempmold.jpg.1354x0_q80_crop-smart.jpg

49. *DataSheet PA 3200Gf*. Eos. Dostupné také z: http://3d-prototyp.si/wp-content/uploads/2014/04/MaterialData_PA_3200GF_en.pdf

50. PA 2200-2201. In: *Https://www.eos.info/pa-2200-2201* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.eos.info/pa-2200-2201-da42d3327dfc8bf2>.

51. Turbína. In: *Https://revpart.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://revpart.com/services/3d-printing/>

52. PA 3200 gf. In: *Http://3dprintingsystems.co.za* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://3dprintingsystems.co.za/products/3d-printers/elite-sls-3d-printers-overview/>

53. Ultem 1010. In: *Https://media.licdn.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://media.licdn.com/mpr/mpr/AEEAAQAAAAAAWYAAAAJDlZYTAXMmJmLWVvMTctNDhjYS1iZWExLTQ3NjlkOGZhYzAxZg.jpg>

54. Form 2. In: *Https://millennitek.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://millennitek.com/wp-content/uploads/2017/03/Form2.jpg>

55. Eosint P 385. In: *Http://144721.w21.wedos.ws* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://144721.w21.wedos.ws/wp-content/uploads/2016/09/eosint-600.jpg>
56. SLS. In: *Http://swiatdruku3d.pl* [online]. 2013 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://swiatdruku3d.pl/sls/>
57. FDM. In: *Http://engatech.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://engatech.com/wp-content/uploads/2015/05/FDM-Demonstratino.png>
58. Fortus 450. In: *Http://www.advancedtek.com* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: http://www.advancedtek.com/3d_printers/fortus-450mc
59. Expanzní nádoba. In: *Https://www.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0025/002510o5.gif>

A Tabulka vzorků

Vzorek č.	0.	1.	2.	3.	4.	5.
Výrobní technologie	FDM	FDM	SLA	SLS	SLA	SLS
Materiál	ULTEM 1010	ULTEM 1010	Durable	PA 2200	High Temp	PA 3200GF
Váha	341 g	343 g	331 g	279 g	-	358 g
Spotřebovaný materiál	303 cm ³ + 75cm ³	303 cm ³ + 75cm ³	392 ml	-	392 ml	-
Doba výroby	17 hod	17 hod	53 hod	-	33 hod	-
Cena materiálu	3 991 Kč	3 991 Kč	1 343 Kč	-	1 850 Kč	-
Cena provozu stroje	3 675 Kč	3 675 Kč	5 650 Kč	-	3 731 Kč	-
Celková cena vzorku bez DPH	7 666 Kč	7 666 Kč	6 993 Kč	6 934 Kč	5 581 Kč	6 934 Kč
Tepelný průhyb při 0,45 MPa	213 °C	213 °C	43 °C	176 °C	289 °C	157 °C
Modul pevnosti v ohybu	2820 MPa	2820 MPa	820 MPa	1500 MPa	5100 MPa	2900 MPa
Modul pružnosti v tahu	2770 MPa	2770 MPa	1260 MPa	1650 MPa	-	3200 MPa
Pevnost v tahu	81 MPa	81 MPa	31,8 MPa	48 MPa	51,1 MPa	51 MPa
1. zk. tlakem 1 - 10barů	2 bary - uniká vzduch mezi vrstvami	OK	OK	OK	OK	OK
Termo zk. 110°C, čas 12h	OK	OK	Viditelné změkčení	OK	OK	OK
Po zchlazení	Beze změny	Beze změny	Návrat do normálu	Beze změny	Viditelné zkrěhnutí	Beze změny
2. zk. tlakem 1 - 10barů	2 bary - uniká vzduch mezi vrstvami	Beze změny	Beze změny	Beze změny	8 barů - roztržení	Beze změny